Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 3, Jul.-Agu. 2024, p. 337-350

Determination of Groundwater Resources Potential in Fractured and Karstic Formations of West Azerbaijan Province

A. Vaezihir[1*], M. Khalkhali[2], M. Tabarmayeh[3]

1, 2 and 3- Professor, M.Sc. Graduated and Post-doctoral Researcher in Hydrogeology, Faculty of Natural Science, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.
([*]- Corresponding Author Email: rvaezi@tabrizu.ac.ir)

Received: 13-04-2024 Revised: 14-05-2024 Accepted: 21-05-2024 Available Online: 21-05-2024	**How to cite this article:** Vaezihir, A., Khalkhali, M., & Tabarmayeh, M. (2024). Determination of groundwater resources potential in fractured and karstic formations of West Azerbaijan province. *Journal of Water and Soil*, *38*(3), 337-350. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87603.1402

Introduction

Groundwater is an important resource for domestic, agricultural, and industrial purposes (Andualem and Demeke, 2019). However, the growing population and advanced irrigation technologies have significantly led to increased groundwater exploitation resulting in aquifer depletion. Exploitation of groundwater from fractured rock aquifers using wells to supply drinking water is more sustainable than the utilization of springs with low and variable discharge. In the case of drought and periods of critical condition of water usage, springs of fractured rock aquifers may dry up or decrease making them unreliable water resources to supply drinking water. Over recent decades, the use of fractured rock and karstic units as a remarkable water resource is known as a valuable source of freshwater worldwide. However, these aquifers are extremely vulnerable to contamination due to their unique hydrogeological characteristics and require more protection (Zarvash & Vaezi, 2014). These resources contribute to providing more than 70% of the rural population and around 50% of the urban population with drinking and household demand needs. Since the degree of development of karst landforms varies substantially from region to region, exploring groundwater potential zones in karstic or fractured rock domains across the world is important, which is mostly achieved using evaluating affecting factors in creating the groundwater occurrence. This evaluation is done by incorporating weighted factors such as Weighted Overlay, Weighted Sum, and Fuzzy Overlay and utilizing geographic information systems (GIS) or other remote sensing techniques, which is addressed frequently in literature summarized by Vaezihir and Tabarmayeh (2016); Seif and Kargar (2011); and Amiri *et al*. (2021). Considering the importance of such issue, this research aims to investigate the potential of karstic or fractured rock resources in West Azerbaijan to gain more insight into this valuable resource of groundwater.

Materials and Methods

West Azerbaijan province, with an area of 43,660 km² including Lake Urmia, is equivalent to 2.65% of the total area of Iran and located in the Alborz-Azerbaijan structural zone with a mean annual precipitation of about 370 mm. The maximum temperature of this province, dominated by a semi-arid and Mediterranean climate, is recorded in Shahin Dezh and Miandoab, and the minimum is measured in Chaldoran, and Tekab Metrological Stations, respectively. About 78% of the total area of West Azerbaijan province is formed by karstic units with more spatial distribution in the southern area. This karstic area encompasses 71% of the total province springs with 59% of the total discharge. In the current research, lithology unit types, fracture density, elevation, slope, aspect, drainage density, and vegetation coverage, along with the precipitation, area, and humidity index as the main factors were regarded as governing factors in the development of karst aquifers, have been considered to evaluate the potential groundwater resources. After the preparation of all affected layers using various data resources including available geological maps digital elevation map of West Azerbaijan Province obtained from the Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Landsat satellite data, the Fuzzy logistic and SUM and Weighted overlay technique has been used to prepared

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87603.1402

groundwater potential zone.

Results and Discussion

The groundwater potential zone were determined through combining 9 affected layers in developing the groundwater resource. The results obtained based on employing both weighted overlay and SUM were classified into 5 classes including low, very low, medium, high and very high potential zones. The index value in SUM methods estimated to be 16.24, 26.24, 24.24, 20.95, 12.13%, while it changes to 22.82, 24.13, 22.14, 16.23, and 14.67 respectively. Overlaying the location of springs as an indicators of groundwater resource on hardrock and karstic domain on generated maps showed that 30.9 and 33.08 percentage of springs fall in area with the high and very high potential zone, respectively. A significant differences on maps generated based on two mentioned technique, particularly in area classified as low potential zone with 24.13 and 16.24 percent in weighted overlay and SUM.

Conclusion

Investigation of the groundwater potential zone by integrating the layer provided by Fuzzy logic technique through two SUM and weighted overlay methods indicated the province of Azerbaijan Arabi has a moderate level of classification. However, in some areas, there were significantly higher or lower potentials.

Keywords: Fuzzy, Groundwater potential, Karstic and fractured rock aquifer, SUM, Weighted Overlay Method

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۸، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۳، ص. ۳۵۰-۳۳۷

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در واحدهای سازند سخت و کارستی استان آذربایجان غربی

عبدالرضا واعظی هیر[1*] - مرضیه خلخالی[2] - مهری تبرمایه[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

چکیده

سفره‌های کارستی منابع بسیار با ارزشی هستند که دستیابی به آن‌ها در مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استان آذربایجان غربی با مساحت ۴۳۶۶۰ کیلومتر مربع، بر اساس تقسیم‌بندی واحدهای زمین‌شناسی و ساختمانی ایران در زون البرز غربی و آذربایجان قرار گرفته است که حدود ۷۸ درصد از سطح این استان را سازندهای کارستی و سازندهای سخت پوشش می‌دهد. وجود چنین سازندهایی باعث به وجود آمدن چشمه‌های متعدد در این استان شده است که در مجموع ۷۱ درصد از چشمه‌های موجود در این استان را شکل می‌دهند. این مطالعه به‌منظور پتانسیل‌یابی منابع آبی موجود در سازندهای سخت و کارستی این استان انجام گردید. بدین‌منظور ۹ پارامتر لیتولوژی، تراکم شکستگی، آبراهه، پوشش گیاهی، شیب، جهت شیب، ارتفاع با فاکتور بارش، ارتفاع با فاکتور سطح گستردگی بارش و شاخص رطوبت به‌عنوان عوامل تأثیرگذار در نفوذ آب و تشکیل آبخوان در نظر گرفته شد و با بکارگیری روش‌های منطق فازی، UM و Weighted Overlay نقشه‌هایی که نمایانگر نسبی پتانسیل منابع آبی بودند تهیه، صحت‌سنجی و سپس مقایسه گردید. نتایج حاصل نشان داد که مناطق مشخص شده با پتانسیل بالا به‌ترتیب در روش SUM و Weighted Overlay ۳۳/۰۸ و ۳۳/۰۹ درصد از کل چشمه‌ها را پوشش می‌دهد. بنابراین بر اساس درصد تطابق موقعیت قرارگیری چشمه‌ها که شاخصی برای گسترش کارست هستند، می‌توان نتیجه گرفت که روش SUM در پتانسیل‌یابی آبخوان‌های کارستی استان آذربایجان غربی قابلیت بهتری دارد. بر اساس این روش ۲۵ درصد از این استان دارای پتانسیل خیلی زیاد و زیاد برای تشکیل آبخوان‌های کارستی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان سازند سخت و کارستی، پتانسیل‌یابی منابع آبی، منطق فازی، Weighted Overlay، SUM

مقدمه

منابع آب زیرزمینی یک منبع طبیعی مهم برای استفاده در مصارف خانگی، کشاورزی و صنایع می‌باشد که به‌دلیل افزایش جمعیت، شیوه‌های پیشرفته آبیاری و تقاضا برای این منابع با ارزش افزایش چشمگیری داشته است (Andualem & Demeke, 2019). پتانسل یابی این منابع با ارزش در مدیریت منابع آب به‌خصوص در سازندهای سخت که به‌صورت پراکنده در سطح زمین گسترده هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سازندهای سخت از نظر هیدروژئولوژیکی به دو دسته تشکیلات کارستی و غیر کارستی تقسیم می‌شوند. سازندهای کارست به سازندهایی گفته می‌شود که با نفوذ آب جوی به آن‌ها پدیده انحلال حفره‌ها صورت می‌گیرد (مانند سنگ‌های آهکی و دولومیت). این سازندها دارای ویژگی ژئومورفولوژی پیچیده و ویژگی‌های هیدرولوژیکی بسیار خاص می‌باشند (Zarvash *et al*., 2014). این ویژگی‌های منحصر به فرد و ماهیت سه‌بعدی پدیده‌های کارستی نتیجه تعامل پیچیده بین محیط‌های زمین‌شناسی، شرایط آب و هوایی و عوامل بیولوژیکی در مقیاس‌های زمانی طولانی می‌باشد (Moradi *et al*., 2016). سفره‌های کارستی منابع آب شیرین ارزشمندی هستند که به‌دلیل کم آبی در بسیاری از نقاط ایران، نیاز به این منابع بیش از پیش محسوس می‌شود. از آنجا که توزیع مکانی و گسترش سازندهای

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب استاد، دانش‌آموخته و پژوهشگر پسادکتری هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: rvaezi@tabrizu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87603.1402

کارستی و سازندهای سخت در سطح زمین به‌طور یکسان نیست، جهت بهره‌برداری درست از این منابع، شناسایی و پتانسیل‌یابی آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. کمبود اطلاعات و محدودیت‌های هزینه و دسترسی به اطلاعات شناسایی منابع آب زیرزمینی در سازندهای کارستی را با مشکل روبرو می‌کند. با این حال تکنیک‌های وجود دارند که این امکان را میسر می‌سازد. بررسی عوامل مرتبط با تشکیل منابع آب و استفاده از روش‌های مختلف وزن‌دهی با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، داده‌ها و ابزارهای مهمی را برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی فراهم می‌کنند. روش‌های وزن‌دهی با اختصاص وزن و امتیاز مناسب بر اساس نقش هر پارامتر بر روی خروجی، پتانسیل تشکیل پدیده‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار می-دهد. ترکیب این روش‌ها با روش منطق فازی که باعث افزایش دقت در نتایج می‌گردد در دهه‌های اخیر در مطالعات مختلفی به‌ویژه در بررسی منابع آبی مورد توجه قرار گرفته است (Hassani Pak, 2011; Kazemi *et al*., 2015). از جمله این موارد می‌توان به مطالعات سیف و کارگر (Seif & Kargar, 2011) اشاره کرد که با روش‌های سلسله مراتبی و Weighted Overlay و Weighted sum پتانسیل منابع آب زیرزمینی را در حوضه آبریز سیرجان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که پهنه پتانسیل بالا بیشتر منطبق بر رسوبات آبرفتی درشت دانه دوران چهارم و مخروطه افکنه‌ها در این منطقه می‌باشد. واعظی هیر و تبرمایه (Vaezihir & Tabarmayeh, 2016) پتانسیل آب زیرزمینی در سازندهای سخت را با بکارگیری روش‌های تصمیم گیری چند معیاره بررسی کردند و نشان دادند که روش AHP نسبت به روش SAW که یک روش هم‌پوشانی وزنی می‌باشد، قابلیت بهتری در پتانسیل‌یابی دارد. بر اساس این مطالعه که در حوضه آلمانه انجام یافته است، بیش از ۵۰ درصد منطقه دارای پتانسیل منابع آبی متوسط به بالا می‌باشد، که بیشتر مناطق غربی و مرکزی محدوده را شامل می‌شود.

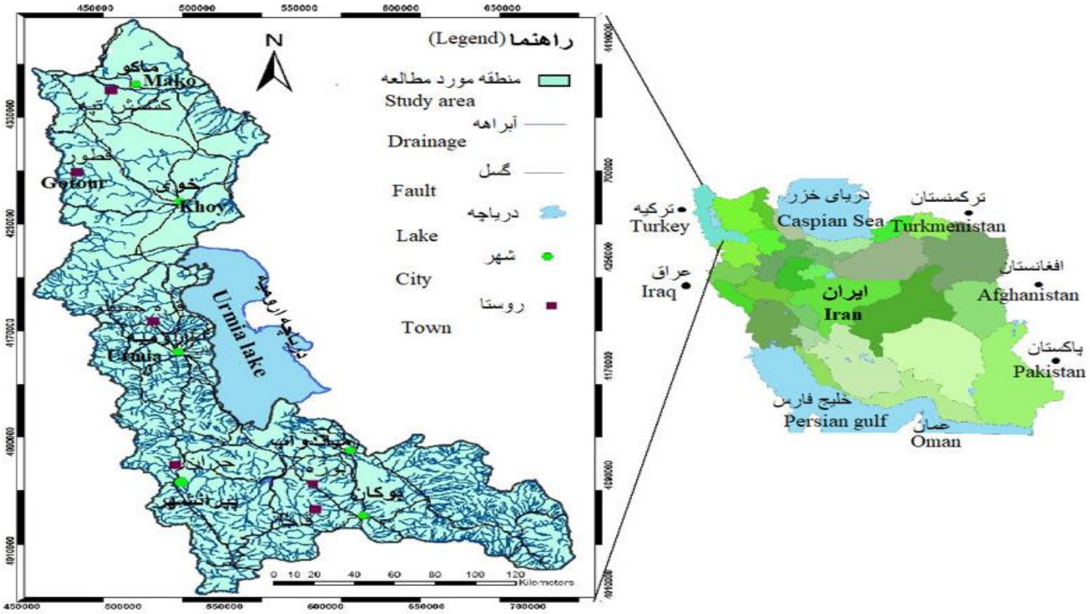
اکبری جونوش و همکاران (Akbari Jonosh *et al*., 2018) تأثیر ساختارهای تکتونیکی در اکتشاف منابع آب کارستی را به کمک روش AHP-Fuzzy مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین پتانسیل کارست‌شدگی در زون ساختاری البرز مرکزی و البرز شرقی می‌باشد. مزیدی و همکاران (Mazidi *et al*., 2016) در مطالعه‌ای توسعه کارست با استفاده از منطق فازی را در حوضه دشت سوسن و دشت ایذه پتانسیل‌یابی و قسمت‌های مختلف دشت را از نظر کارستزایی شناسایی کرده‌اند. امیری و همکاران (Amiri *et al*., 2021) مطالعه‌ای با عنوان پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش منطق فازی انجام داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که حدود ۳۱ درصد از حوزه آبخیز داراب در دو طبقه با پتانسیل خوب و خیلی خوب قرار دارند. سپهری پور و واعظی هیر (Sepehripour & Vaezihir, 2011) در مطالعه‌ای به پی‌جویی و اکتشاف منابع آب استراتژیک سازند سخت و کارستی شهرستان میانه پرداختند. در این مطالعه مشخص گردید، ۸۰/۰۱ درصد از چشمه‌ها با مناطق دارای پتانسیل زیاد و بسیار زیاد تطابق دارند و ۶۷/۰۶ درصد از آبدهی چشمه‌ها به مناطق با پتانسیل بالا تعلق دارند.

با توجه به اهمیت موضوع، این مطالعه با هدف شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی بر روی واحد سازند سخت و کارستی در استان آذربایجان غربی، که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است، انجام شده است. با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مؤثر تهیه شده به روش فازی شامل لیتولوژی، تراکم گسل، پوشش گیاهی، چگالی آبراهه‌ها، لایه شیب، لایه جهت شیب و شاخص رطوبت و همچنین دو پارامتر جدید ارتفاع با فاکتور بارش و ارتفاع با فاکتور واحد سطح (گستردگی) بارش و با به کارگیری روش‌های هم‌پوشانی، مناطق از نظر شدت پتانسیل کارستی و سازند سخت که در برگیرنده منابع با ارزش آب زیرزمینی می باشند، شناسایی خواهد شد. در این مطالعه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با دو روش SUM و Weighted Overlay تهیه و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. این مطالعه با شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در یک مقیاس استانی و وسیع با کمترین هزینه و زمان ممکن، در شرایط استراتژیک نیاز آبی به مدیریت منابع آب کمک خواهد کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آذربایجان غربی (با احتساب دریاچه ارومیه) با مساحت (با احتساب دریاچه ارومیه) ۴۳۶۶۰ کیلومتر مربع در شمال غربی ایران قرار دارد (شکل ۱). متوسط بارندگی این استان حدود ۳۷۴ میلی‌لیتر می‌باشد و بارش مناسب باعث جریان رودهای دائمی زیادی در این استان شده است. از لحاظ میزان بارش، سه حوضه جغرافیایی در استان می‌توان تشخیص داد: حوضه غرب دریاچه ارومیه، حوضه شمالی دریاچه ارومیه به رودخانه ارس و حوضه جنوب دریاچه ارومیه. استان آذربایجان غربی عمدتاً تحت تأثیر جریان‌های مرطوب اقیانوس اطلس و مدیترانه‌ای قرار دارد و وجود رشته کوهها که به‌صورت دیواری در جهت شمال و جنوب غربی امتداد یافته‌اند، باعث شده است که استان آذربایجان غربی از مناطق سردسیر محسوب شود. با توجه به داده‌های هواشناسی، ایستگاه های چالدارن و تکاب با کمترین دما و ایستگاه‌های شاهین‌دژ و میاندوآب با بیشترین دما اندازه گیری شده‌اند. نتایج حاصل از میانگین بارندگی سالانه و میانگین دمای ایستگاهها نشان داد که این استان براساس طبقه‌بندی دومارتن، در منطقه نیمه خشک و مدیترانه‌ای واقع شده است. استان آذربایجان غربی بر اساس تقسیم‌بندی انجام شده بر روی واحدهای زمین‌شناسی و ساختمانی ایران در زون البرز غربی و آذربایجان قرار می‌گیرد.



شکل ۱- موقعیت استان آذربایجان غربی
Figure 1- Location of West Azerbaijan province

این استان عمدتاً از واحدهای گچی، گرانیت، ماسه سنگ، کنگلومرا، ساختارهای بالشی و بازالتی تشکیل شده است. همچنین سازندهای دورود، روته، بهرام، کهر، باروت، مبارک، روته، لالون، میلا، مراغه، و شمشک به همراه سنگ‌های آهکی، گرانیت دگرگونی، دولومیت ماسه سنگ و شیل از دیگر تشکیلات زمین‌شناسی این استان می‌باشند.

تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی

فن‌آوری‌های جدید سنجش از دور و GIS امکان دسترسی به طیف زیادی از داده‌ها را فراهم کرده است و به‌عنوان ابزارهای مفیدی برای ارزیابی، بازدید و محافظت از منابع آب شناخته شده‌اند (Sener *et al.*, 2005). تکنیک‌های سنجش از دور با ترکیب طیف گسترده‌ای از اطلاعات، در توسعه و مدیریت منابع آب و همچنین ارزیابی سریعتر پدیده‌ها نقش مؤثری داشته است (Preeja *et al.*, 2011). در دهه‌های اخیر، استفاده از RS و GIS به همراه سایر روش‌هایی که مبتنی بر وزن دهی عوامل مؤثر در ایجاد یک پدیده می‌باشد، با ایجاد نتایج بسیار مفید نقش بسیار چشمگیری در مطالعات مختلف به‌ویژه مطالعات منابع آب و زیست‌محیطی داشته است. در روش‌های متکی بر وزن‌دهی که از تلفیق فاکتورهای در نظر گرفته شده توسط کاربر، یک لایه نهایی حاصل می‌شود، به هر فاکتور و معیارهای آن با توجه به اهمیت هر یک در ایجاد و رخداد پدیده وزن و رتبه‌ای اختصاص داده می‌شود و سپس با تلفیق آن‌ها لایه‌های خروجی تهیه می‌گردد. سپس لایه‌های خروجی به مناطقی به‌صورت نسبی از نظر شدت پدیده مورد نظر طبقه‌بندی می‌گردند. از جمله روش‌های هم‌پوشانی مورد استفاده در این مطالعات، تکنیک‌های Weighted Overlay و SUM می‌باشد که در روش اول با توجه به اهمیت هر یک از لایه‌ها، وزن مناسب بر اساس درصد از ۱۰۰ و در روش دوم از ۰ تا ۱۰ اختصاص داده می‌شود. علاوه بر روش های نامبرده، تهیه و تلفیق لایه‌ها با به کارگیری روش منطق فازی از جمله دیگر روش‌هایی هست که برای افزایش دقت نتایج به‌طور قابل ملاحظه مورد استفاده قرار می‌گیرد. به کارگیری تکنیک فازی نه تنها احتمال وقوع یک پدیده مربوط به مجموعه‌های متعدد را تعیین می‌کند، بلکه روابط بین عضویت در مجموعه‌های متعدد را نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و نتایج دقیق‌تر و بهتری را ارائه می‌کند. در این مطالعه برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در استان آذربایجان غربی، لایه-های مختلفی در نظر گرفته شده است که هر یک در ادامه به‌صورت مفصل مورد بحث قرار گرفته است.

منطق فازی و روش‌های هم‌پوشانی

مناسب‌ترین روش برای مدل‌سازی سیستم‌هایی که بسیار پیچیده هستند و اطلاعات کافی ندارند یا اطلاعاتی در مورد آن‌ها مبهم و ضمنی است، روش فازی است. در این روش نقشه معیارها در محیط نرم‌افزار Arc GIS تهیه می‌گردد و سپس همه نقشه‌ها با استفاده از Fuzzy Membership (تابع عضویت فازی) در محیط نرم‌افزار به فازی تبدیل می‌شوند. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، از تابع لجستیک معادله ۳ برای فازی کردن نقشه‌ها استفاده شده است. تابع لجستیک تمام داده

ها را به محدوده (۰،۱) منتقل می‌کند (معادله ۱).

$$Fx = \frac{1}{1+\exp[-s(Ev-i)]} \quad (۱)$$

در این رابطه، Fx نقطه فازی اختصاص یافته به Ev در محدوده صفر و یک است، Ev مقدار عددی لایه‌ها در محدوده نامحدود است، s و i به‌ترتیب شیب و نقطه عطف تابع لجستیک هستند، که با آزمون و خطا بدست می‌آیند. بنابراین، این پارامترها شکل تابع و در نتیجه مقدار تابع عضویت فازی را تعیین می‌کنند و وزن‌ها در محدوده صفر و یک قرار دارند (Yousefi & Carranza, 2015).

در روش های همپوشانی، معیارهای مؤثر در ایجاد یک پدیده شناسایی شده و بر اساس اهمیت هر یک از این معیارها و زیر معیارهای آن‌ها در ایجاد پدیده مورد نظر به‌ترتیب وزن‌دهی و رتبه‌بندی می‌شوند. این وزن و رتبه‌ها بر اساس قضاوت‌های کارشناسی هر تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند. سپس ارزش نهایی هر گزینه از مجموع وزن‌های آن گزینه در معیارهای مختلف بدست می‌آید. در روش‌های مختلف مقیاس و رنج وزن و رتبه‌های اختصاص داده شده متفاوت می‌باشد.

تهیه لایه‌های اطلاعاتی

به‌طور کلی، از دو روش سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در روند بدست آوردن لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در این تحقیق استفاده شد. در قسمت اول تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (با نوع سنجنده ۱۱OLI-TIRS باند و تاریخ تصویربرداری ۲۰۱۹/۰۷/۲۰) وارد محیط Arc GIS 10.7.1 شد. به این ترتیب از داده های این ماهواره برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی شاخص پوشش گیاهی (NDVI)[1] و شاخص رطوبت طبیعی (NDMI)[2] استفاده گردید. سرانجام با فراخوانی این دو لایه و تکمیل لایه‌های دیگر، و تعیین وزن‌های استاندارد به روش منطق فازی، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی بر پایه وزن‌های بدست آمده استخراج گردید. هر یک از این لایه‌ها در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

لایه لیتولوژی: واحدهای زمین‌شناسی منطقه با توجه به خواص هیدرولیکی مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار گرفتند. برای تهیه این لایه، به سنگ آهک ضخیم لایه و آهک‌های دولومیتی بیشترین وزن و به کنگلومرای رودخانه‌ای، کنگلومرای مخروط‌افکنه، ماسه‌سنگ و رسوبات آبرفتی که جزء سازند سخت نمی‌باشند، کمترین وزن اختصاص داده شد. سازندهای که از ترکیب چند مواد زمین‌شناسی بودند با توجه به درصدشان، متوسط‌گیری وزنی شده و امتیاز آن‌ها محاسبه گردید (شکل ۲). بدیهی است سنگ‌های سخت زمانی نفوذپذیری لازم را دارا خواهند بود که همراه شکستگی باشند.

تراکم شکستگی: برای تهیه این لایه از نرم‌افزار GIS استفاده گردید. در ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه ژئورفرنس گردید و در محیط نرم‌افزار GIS، شکستگی‌های موجود جدا شد. سپس با استفاده از تراکم خط (تابع چگالی)، نقشه تراکم شکستگی تهیه گردید (شکل ۳) و پس از طبقه‌بندی، مناطق با بیشترین تراکم شکستگی بالاترین امتیاز را کسب کردند.

لایه تراکم پوشش گیاهی (NDVI): بازتاب طیفی گیاهان سالم (یا کلروفیل) بیشتر از طول موج‌های دیگر در طول موج الکترومغناطیسی نزدیک مادون قرمز (NIR) و سبز اتفاق می‌افتد. از آنجایی‌که گیاهان سالم حاوی کلروفیل نور آبی و بیشتر طول موج‌های قرمز را جذب می کنند، گیاهان به رنگ سبز دیده می‌شوند. بنابرین این مسئله می‌تواند در شناسایی مناطق دارای پوشش گیاهی کمک کند. برای تهیه این لایه، از دو باند ۵ و ۴ تصویر Landsat 8 در نرم‌افزار Arc GIS 10.7.1استفاده شد (شکل ۴) و شاخص گیاهی نرمال NDVI بر اساس معادله ۲ محاسبه گردید. مقادیر عددی محاسبه شده بین ۱ و ۱− متغیر می‌باشد. به‌طوری‌که مقدار صفر و کمتر برای مناطق خیلی کم پوشش گیاهی یا عدم پوشش گیاهی و مقدار بیش از صفر برای مناطق دارای پوشش گیاهی می‌باشد.

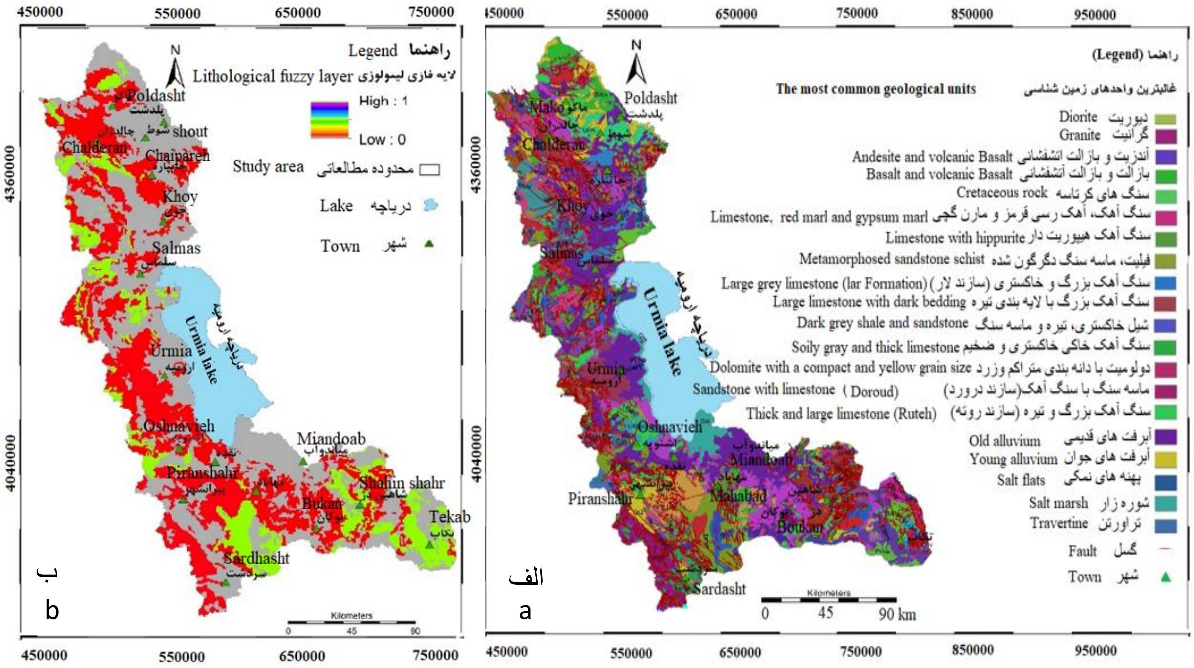
$$NDVI = \left(\frac{NIR-RED}{NIR+RED}\right) \quad (۲)$$

لایه تراکم آبراهه: آبراهه‌ها در نقش انتقال رواناب رابطه معکوسی با نفوذپذیری زمین دارند. یعنی با افزایش تراکم آبراهه‌ها امکان نفوذ آب کاهش می‌یابد. برای تهیه مسیرهای آب، ابتدا نقشه‌های DEM منطقه و نقشه‌های رقومی تهیه و با استفاده از تراکم خط (تابع چگالی)، نقشه تراکم آبراهه مطابق شکل ۵ تهیه گردید. در پتانسیل منابع آب زیرزمینی، مناطقی با کم‌ترین تراکم بیش‌ترین پتانسیل را خواهند داشت.

لایه شیب: رواناب‌های سطحی در مناطقی که شیب کمتر و ملایم باشد، بهترین شرایط را جهت نفوذ پیدا می‌کنند. در نتیجه شیب‌های کمتر، تغذیه آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، در مناطقی با شیب زیاد، رواناب سطحی فرصت نفوذ و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی را ندارد. اگرچه عوامل دیگری مانند پوشش گیاهی و نوع سازندها تأثیر قابل توجهی در این روند دارند، اما شیب سطح زمین نیز در نفوذ آب بسیار نقش چشمگیری دارد. پس از تهیه نقشه DEM منطقه، لایه رستری شیب تهیه شد و در مرحله طبقه‌بندی مجدد در محیط نرم‌افزار GIS، بیشترین امتیاز به مناطقی با کمترین شیب داده شد. لازم به ذکر است که شیب دامنه‌ها در استان آذربایجان غربی از ۰ تا ۶۲/۵ درجه متغیر می‌باشد (شکل ۶).

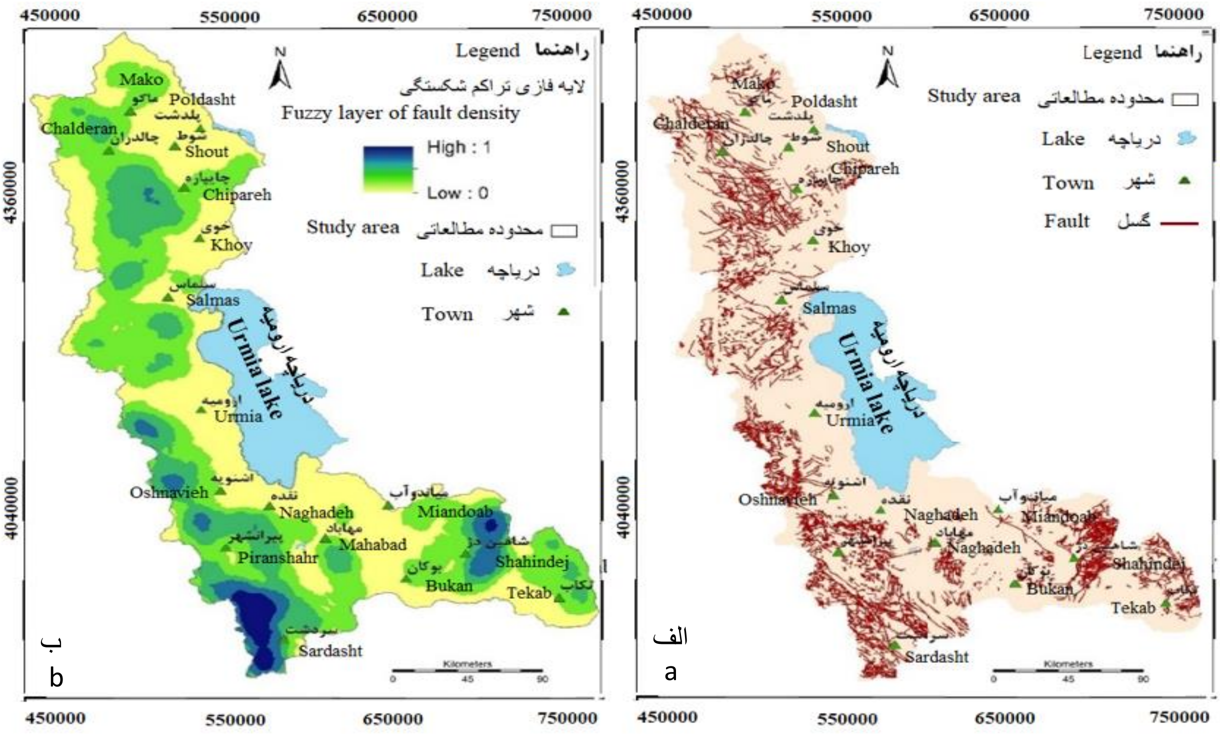
1- Normalized Difference Vegetation Index

2- Normalized Difference Moisture Index



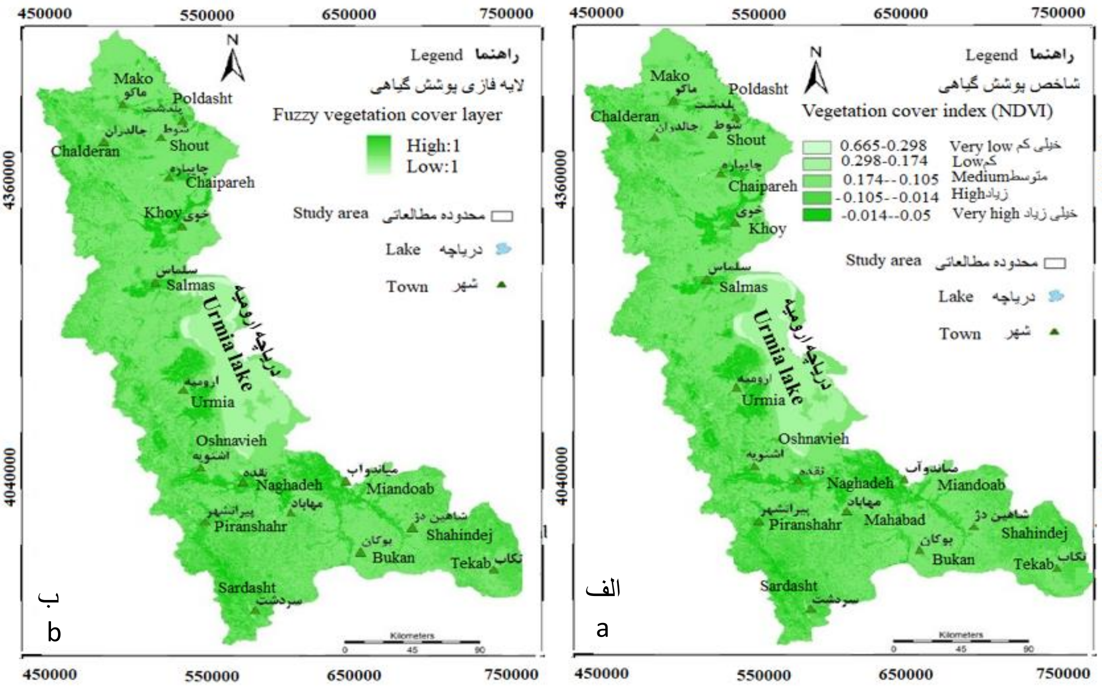
شکل ۲– الف) نقشه زمین‌شناسی و ب) نقشه فازی واحدهای زمین‌شناسی

Figure 2- a) Geological map b) Fuzzy map of geological units



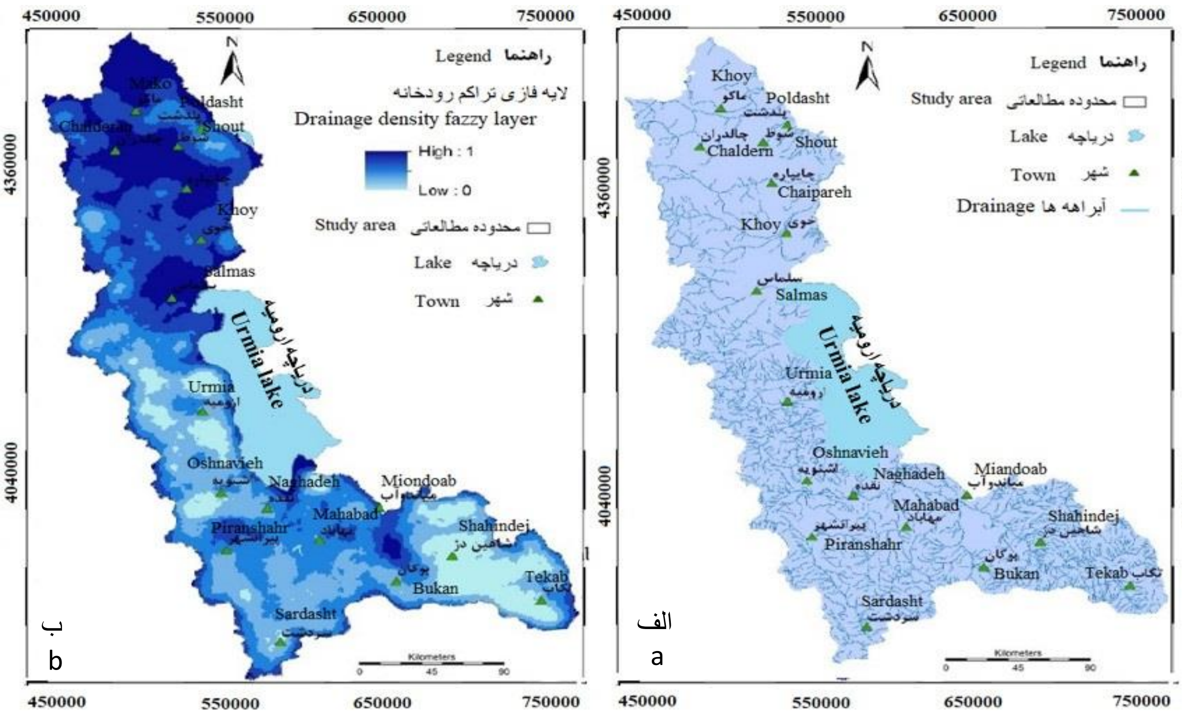
شکل ۳- الف) موقعیت شکستگی‌ها و ب) نقشه فازی تراکم شکستگی‌ها

Figure 3- a) Fault location and b) Fuzzy map of fault density



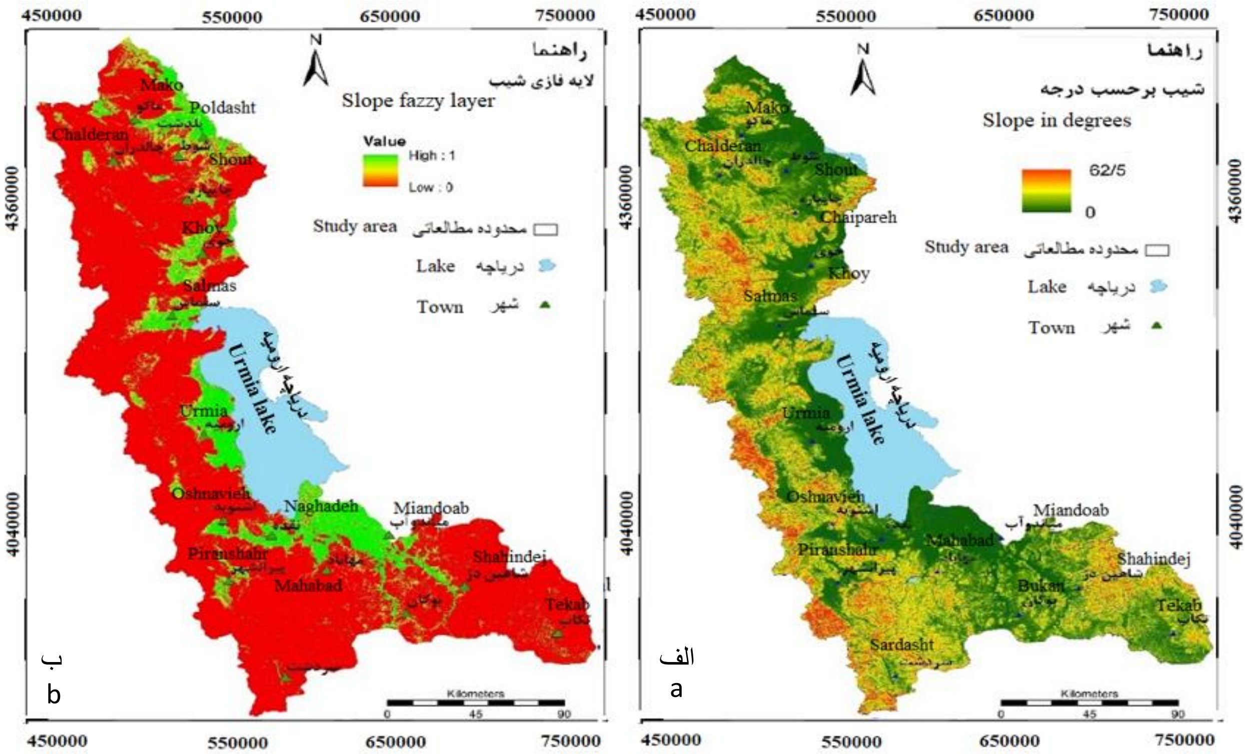
شکل ٤- الف) پراکندگی شاخص پوشش گیاهی و ب) نقشه فازی پوشش گیاهی (NDVI)

Figure 4- a) Distribution of vegetation coverage index and b) Fuzzy vegetation cover map (NDVI)



شکل ٥- الف) پراکندگی آبراهه و ب) نقشه فازی تراکم آبراهه

Figure 5- a) Drainage distribution and b) Fuzzy drainage density map



شکل ٦- الف) تغییرات شیب و ب) نقشه فازی شیب

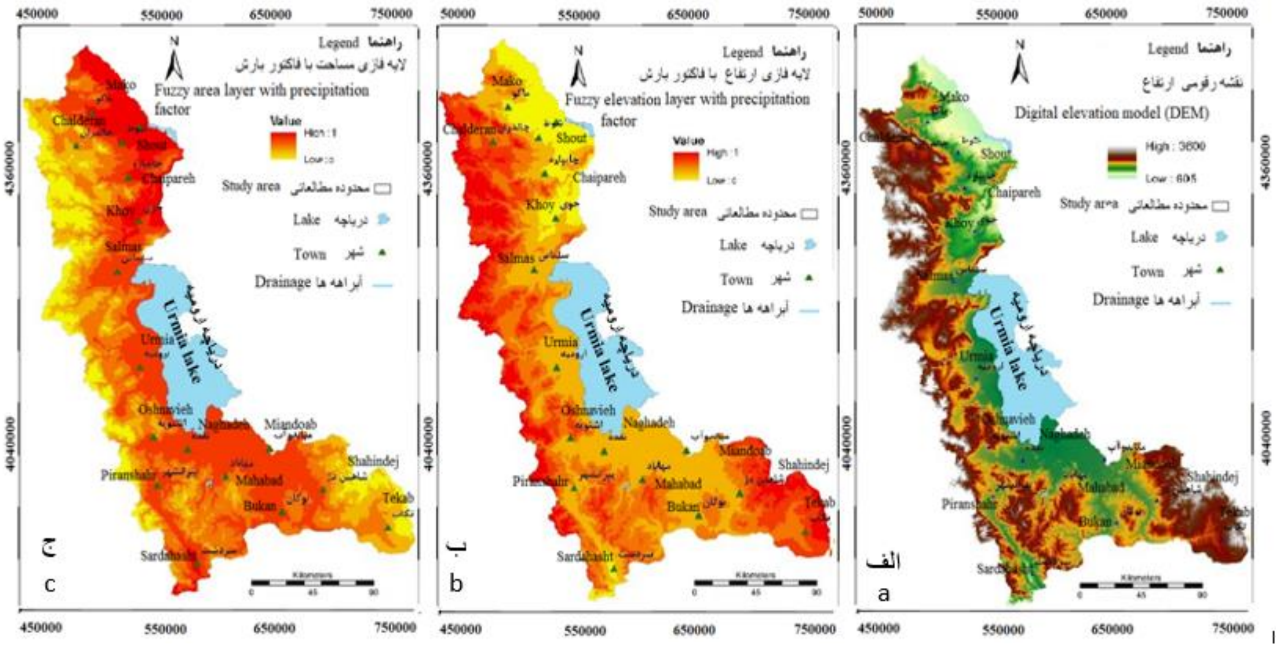
Figure 6- a) Slope variations and b) Fuzzy slope map

لایه ارتفاع: در این لایه از پارامتر ارتفاع تحت عنوان دو تأثیر متضاد بر منابع آب زیرزمینی استفاده شده است. با افزایش ارتفاع، میزان بارش افزایش و دما کاهش می‌یابد، که باعث باران بیشتر و تبخیر و تعرق پایین می‌شود و به برف موجود اجازه می‌دهد تا در فصول گرم به‌تدریج ذوب شده و آب‌های زیرزمینی را تغذیه کند. اما پارامتر دیگری که مورد توجه قرار گرفته است، سطح مؤثر بارش است. از طرف دیگر سطح مؤثر بارش و مساحت حوزه آبگیر با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. زیرا ارتفاعات کم به‌دلیل شیب کمتر گسترده‌ترند. بنابراین در این حالت مناطق مرتفع امتیاز کمتری می‌گیرند. برای تهیه لایه ارتفاع از نقشه DEM منطقه استفاده شد؛ سپس، در مرحله طبقه بندی مجدد، بالاترین امتیاز یک بار به ارتفاعات و بار دیگر به مناطق پست داده شد (شکل ۷).

جهت شیب: این عامل در برخی فرآیندهای هیدرولوژیکی از جمله تأثیر ذوب شدن برف به‌دلیل قرار گرفتن در زاویه تابش نور خورشید، تنوع و پوشش گیاهی و قرار گرفتن در جهت توده‌های بارشی، تأثیر قابل توجهی دارد. برای تهیه این لایه، الگوریتم Aspect بر روی مدل ارتفاعی رقومی (DEM) اعمال گردید و نقشه شیب منطقه تهیه شد (شکل ۸). از آنجا که رطوبت و بارش دریافتی استان آذربایجان غربی از سمت غرب (مدیترانه) و شمال (سیبری) می‌باشد و دامنه‌های شرقی و جنوبی تبخیر بیشتری را متحمل می‌شوند، بنابرین در تهیه این لایه بیشترین امتیاز به طبقات شمالی و شمال غربی اختصاص داده شد.

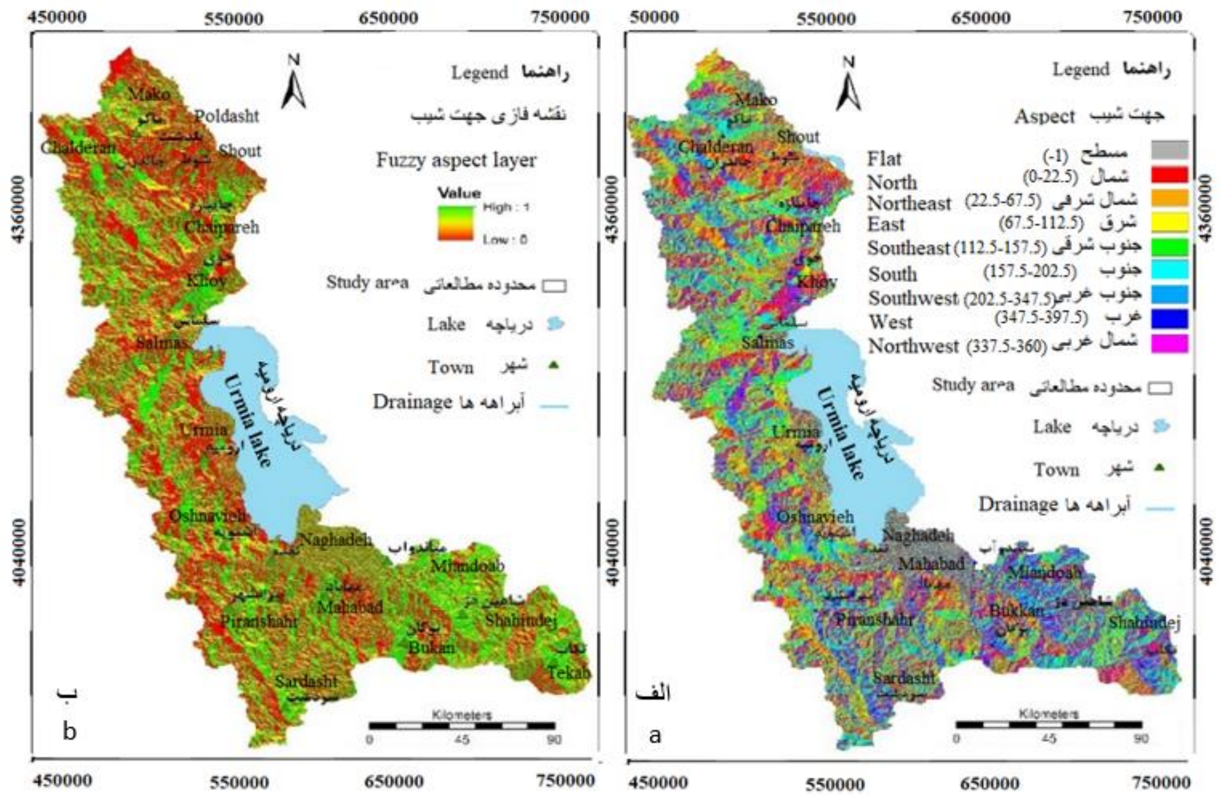
لایه شاخص رطوبت اختلاف نرمال (NDMI): برای تهیه این لایه، ابتدا باندهای ۶ (SWIR) و ۷ (NIR) لندست ۸ به محیط نرم افزار Arc GIS فراخوانی گردید و سپس اصلاحات هندسی و رادیومتری بر روی آن‌ها اعمال شد (معادله ۳). سپس یک لایه رستری و نقشه فازی تهیه گردید (شکل ۹). این شاخص عامل بسیار خوبی برای تعیین مناطق مرطوب و خشک می‌باشد که می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از وجود منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین مقادیر بالای ۰/۱ نشانگر رطوبت زیاد و مقادیر زیر یا نزدیک به ۱- میزان رطوبت کم است.

$$NDMI = \left(\frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}\right) \qquad (۳)$$



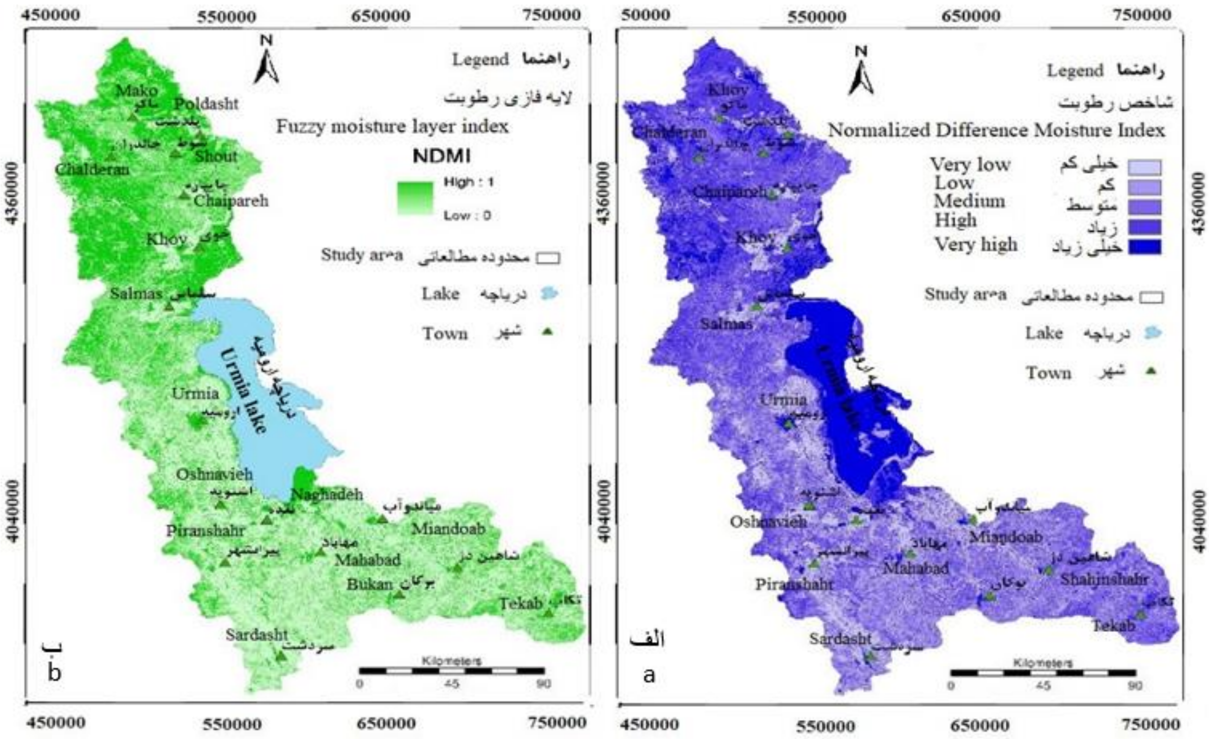
شکل ۷- الف) نقشه رقومی ارتفاعی ب) نقشه فازی ارتفاع با فاکتور بارش ج) نقشه فازی ارتفاع با فاکتور سطح بارش

Figure 7- a) Digital Elevation Map b) Fuzzy Elevation Map with Precipitation Factor c) Fuzzy Elevation Map wih precipitation area Factor



شکل ۸- الف) نقشه تغییرات جهت شیب و ب) نقشه فازی جهت شیب

Figure 8- a) Aspect variation map and b) Fuzzy aspect map



شکل ۹- الف) نقشه تغییرات رطوبت و ب) نقشه فازی شاخص رطوبت

Figure 9- a) Moisture variation map and b) Fuzzy moisture index map

نتایج و بحث

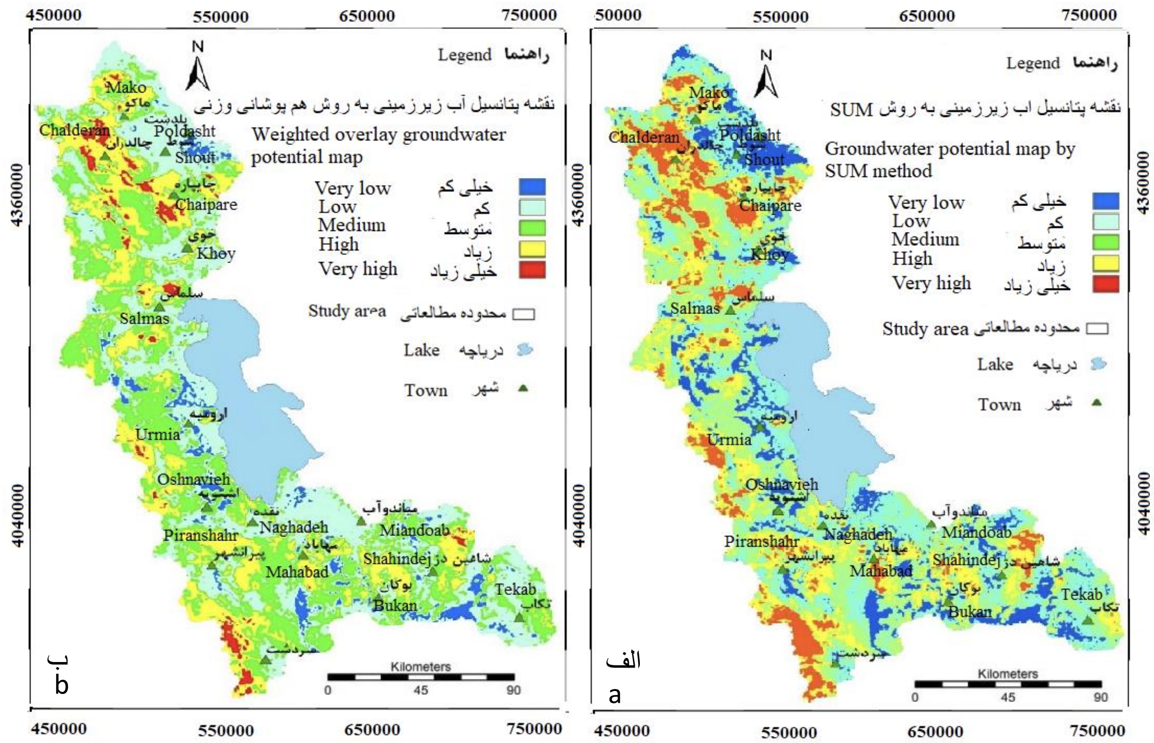
بعد از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر و دارای اهمیت در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در سازند سخت، از روش پتانسیل‌یابی به روش Weighted Overlay و SUM استفاده شد. در این روش ۹ لایه اطلاعاتی که از قبل تهیه شده بودند، بعد از فازی‌سازی جهت ارائه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی بر اساس وزن‌های ارائه شده در جدول ۱ تلفیق شدند. لازم به ذکر هست که برای ارائه وزن تأثیر هر یک از پارامترها، پرسش‌نامه‌هایی برای اخذ نظر کارشناسی ۱۵ نفر متخصص در حوزه منابع آبی گرفته شد و سپس این وزن‌ها با میانگین‌گیری به هر پارامتر اختصاص داده شد.

در روش همپوشانی وزنی Weighted Overlay بعد از تهیه ۹ لایه فازی، به هر یک از این لایه‌ها بر اساس تأثیری که بر نتایج خواهند داشت، وزن مناسب به‌صورت درصدی از ۱۰۰ اختصاص داده شد. سپس با تلفیق لایه‌های تهیه شده نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی بدست آمد. سپس نقشه حاصل به گروه‌هایی با پتانسیل خیلی کم تا خیلی زیاد تقسیم‌بندی شد که هر گروه به‌صورت نسبی مناطق را از نظر پتانسیل آب زیرزمینی نشان می‌دهد (شکل ۱۰-الف). در روش SUM بر خلاف روش قبلی، همپوشانی شاخص مقادیر اختصاص یافته به لایه‌های ورودی می‌تواند هر مقداری باشد و نیازی به افزودن به یک مقدار خاص نیست. بنابرین در این روش پس از آماده‌سازی لایه‌های فازی، با توجه به وزن تأثیر هر یک از پارامترها، که در جدول زیر آورده شده است، لایه‌ها تلفیق گردیدند و بر اساس پتانسیل آن‌ها طبقه‌بندی گردید (شکل ۱۰-ب).

جدول ۱- وزن‌دهی معیارها بر اساس روش SUM

Table 1– Weighted parameters based on the SUM method

شیب Slop	تراکم آبراهه Drainage density	پوشش گیاهی Vegetation coverage	تراکم خطواره‌ها Fracture density	لیتولوژی Lithology
4	5	6	7	9
	رطوبت خاک Soil moisture	جهت شیب Aspect	ارتفاع با بارش Elevation with precipitation	ارتفاع با مساحت Elevation with area
	2	2	3	4



شکل ۱۰- نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به روش الف) SUM و ب)Weighted Overlay

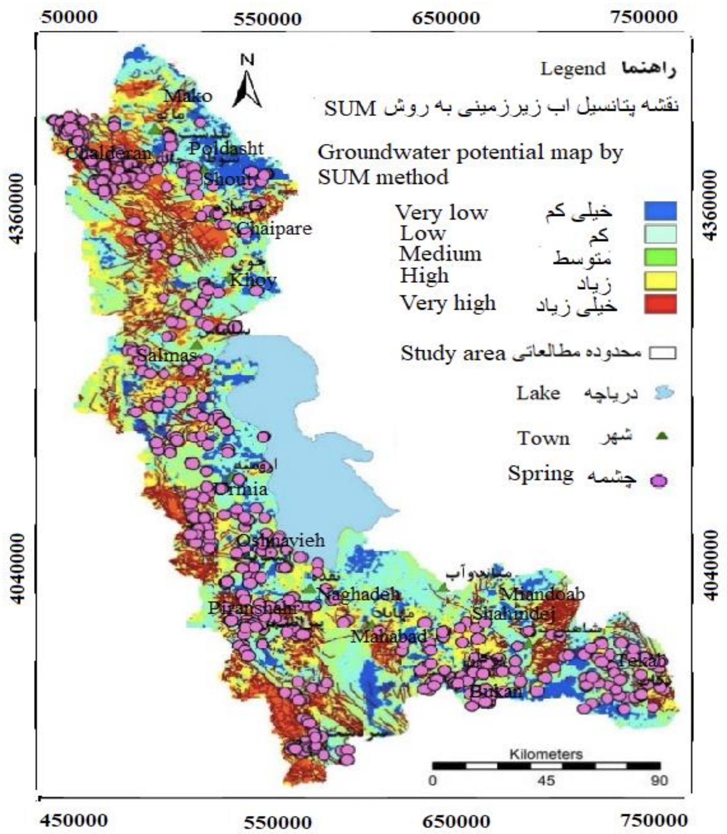
Figure 10- Groundwater potential map using a) SUM method and b) Weighted Overlay

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در نقشه تهیه شده با هر دو روش بیش‌ترین مساحت از استان دارای پتانسیل کارست‌زایی متوسط هستند. مناطقی با پتانسیل بالا و خیلی بالا بیشتر نواحی شمالی و جنوبی دشت قابل مشاهده هست. همچنین با مقایسه نقشه‌های حاصل از دو روش ملاحظه می‌شود که مساحت اختصاص یافته به مناطق با پتانسیل خیلی زیاد و خیلی کم در روش SUM بیشتر از روش Weighted Overlay می‌باشد.

در ادامه برای صحت‌سنجی روش‌ها و برای تعیین کارایی هر یک از مدل‌های به کار گرفته شده در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی، موقعیت چشمه‌های موجود در منطقه که می‌تواند شاخص مناسبی برای صحت سنجی نتایج بدست آمده باشد، استفاده شد و میزان انطباق موقعیت آن‌ها با مناطق با پتانسیل بالا ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در روش SUM، ۳۳/۰۸ درصد و در روش Overlay Weighted ۳۰/۹ درصد پوشش‌دهی چشمه‌ها در منطقه‌بندی بسیار زیاد و زیاد قرار دارند. مناطق با پتانسیل متوسط به‌ترتیب ۲۴/۲۴ و ۲۲/۱۴ درصد از چشمه-های منطقه را در بر گرفته است. تفاوت‌ها قابل توجهی که در نقشه-های حاصل از به کارگیری دو روش متفاوت قابل مشاهده می‌باشد، بیشتر در مناطق بسیار کم به‌ترتیب با مقادیر ۱۶/۲۴ و ۲۴/۱۳ درصد می‌باشد که در شکل ۱۱ و ۱۲ کاملا مشهود هستند. با بررسی این دو روش، مشخص گردید که روش SUM با بیشترین میزان تطابق، دقت نسبی بیشتری در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دارد.

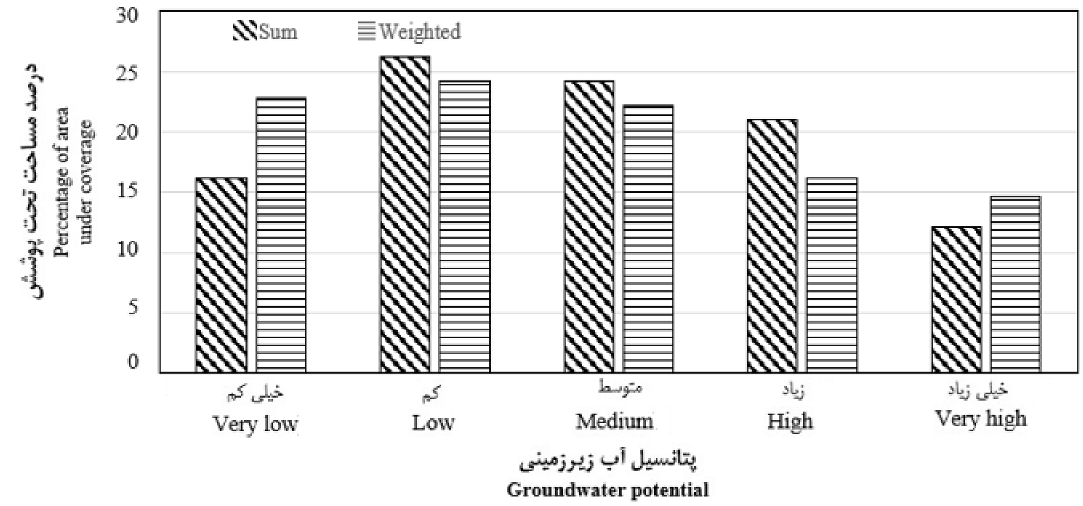
نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده نشان داد که مناطق دارای لیتولوژی قابل نفوذ و تخلخل بالا و همچنین دارای تراکم شکستگی بالا از پتانسیل بالایی جهت پیدایش منابع آب زیرزمینی برخوردار هستند. نتیجه این پتانسیل‌یابی درمنطقه نشان داد که ۷۵ درصد چشمه‌ها با مناطق دارای پتانسیل زیاد و بسیار زیاد به خوبی تطابق دارند. در این مطالعه نتایج حاصل از تلفیق لایه‌های مؤثر که به روش منطق فازی تهیه شده بودند با دو روش SUM و Weighted Overlay با هم جهت تهیه لایه نهایی پتانسیل کارست تلفیق شدند. نتایج حاصل نشان داد که استان آذربایجان غربی از نظر پتانسیل کارست‌زایی در سطح متوسط قرار دارد. با این حال در برخی مناطق پتانسیل خیلی بیشتر و خیلی کمتر هم قابل مشاهده می‌باشد که مساحت این مناطق در روش SUM بیشتر از روش Weighted Overlay می‌باشد.



شکل ۱۱- همپوشانی چشمه‌های موجود در منطقه با نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به روش SUM

Figure 11- Overlay of existing springs in the area with the groundwater potential map using the SUM method



	خیلی کم (Very low)	کم (Low)	متوسط (Medium)	زیاد (High)	خیلی زیاد (Very high)
Sum	16.24	26.24	24.24	20.95	12.13
Weighted	22.82	24.13	22.14	16.23	14.67

شکل ۱۲- صحت‌سنجی نقشه نهایی به روش SUM

Figure 12- Validation of the final map using the SUM method

جهت صحت‌سنجی و تعیین قابلیت هر یک از روش‌ها در پتانسیل کارستزایی از موقعیت چشمه‌های منطقه استفاده شد. نتایج نشان داد که بر اساس روش اول به‌ترتیب ۱۶/۲۴، ۲۶/۲۴، ۲۴/۲۴، ۲۰/۹۵ و ۱۲/۱۳ درصد از چشمه‌ها در منطقه با پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند که این درصد مساحت در روش Weighted Overlay به‌ترتیب به ۲۲/۸۲، ۲۴/۱۳، ۲۲/۱۴، ۱۶/۲۳ و ۱۴/۶۷ تغییر یافته است. با انطباق چشمه‌ها مشخص گردید روش SUM نتایج قابل قبول‌تری نسبت به روش دیگر در پتانسیل‌یابی کارستزایی مناطق دارند. پیشنهاد می‌شود برای دقیق‌تر نمودن نقاط بهره‌برداری مطالعه ژئوفیزیک در مناطق پر پتانسیل صورت گیرد و همچنین پیشنهاد می‌شود مطالعات تکمیلی برای بررسی احتمال فرار آب زیرزمینی از مرزها به سمت کشورهای همسایه صورت گیرد و در صورت اثبات موضوع، تدابیر لازم برای بهره‌برداری از این منابع قبل از خروج از کشور انجام گیرد.

References

1. Akbari Jonosh, R., Ghorashi, M., Babaei, H., Nakhaei, M., & Pourkermani, M. (2018). Effect of tectonic structures on karstic water resources exploration Using Fuzzy-AHP Logic, case study of Semnan province renge Bastam. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 28*(109), 109-120. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22071/gsj.2018.80038
2. Amiri, H., Shafiei, Y., Fakhraei Rad, A., & Kashavarz, H .(2021). Potential identification of groundwater resources using fuzzy logic method (Case study: Darab Fars watershed), *Journal of Geographic Information System and Remote Sensing in Planning*, *12*(3), 45-62. (In Persian with English abstract)
3. Andualem, T.G., & Demeke, G.G. (2019). Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *24*, 100610. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610
4. Hassani Pak, A.A. (2011). *Geostatistics*. University of Tehran press. (In Persian with English abstract)
5. Kazemi, R., Shadfar, S., & Bayat, R. (2015). Investigation of the effective elements in water resource exploration of the hard formations, case study: Lar catchment. *Watershed Engineering and Management*, *7*(4), 389-401. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.103085
6. Mazidi, A., Karam, A., & Koravand Bardpareh, M. (2016). Karst development potential assessment using fuzzy logic (Case study: Sosan and Izeh Plains Watershed). *Quantitative Geomorphological Research*, *18*(5), 130-141.(In Persian with English abstract)
7. Moradi, S., Kalantari, N., & Charchi, A. (2016). Karstification potential mapping in northeast of Khuzestan Province, Iran, using fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) techniques. *Geopersia*, *6*(2), 265-282. (In Persian with English abstract)
8. Preeja, K. R., Joseph, S., Thomas, J., & Vijith, H. (2011). Identification of groundwater potential zones of a tropical river basin (Kerala, India) using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *39*, 83-94. https://doi.org/10.1007/s12524-011-0075-5
9. Seif, A.A., & Kargar, A. (2011). Assessment of groundwater resources potential using analytic hierarchy process and geographic information system, case study: Sirjan Watershed. *Journal of Physical Geography*, *4*(12), 75-90. (In Persian with English abstract)
10. Sener, E., Davraz, A., & Ozcelik, M. (2005). An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: a case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, *13*, 826-834. https://doi.org/10.1007/s10040-004-0378-5
11. Sepehripour, A., & Vaezihir, A. (2021). Exploration of strategic karstic and hard rock groundwater in order to supply drinking water for Miyaneh City in critical water shortage conditions. *Advanced Applied Geology*, *11*(2), 332-348. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22055/aag.2020.33531.2121
12. Vaezihir, A., & Tabarmayeh, M. (2016). Evaluation of potential groundwater resources in fractured rocks using AHP and SAW methods (case study: Almaneh Basin, Marivan, Iran). *Water and Soil*, *30*(5), 1461-1477. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.46758
13. Yousefi, M., & Carranza, E.J.M. (2015). Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping. *Computers & Geosciences*, *74*, 97-109. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.10.014
14. Zarvash, N., Vaezihir, A., & Karimi, H. (2014). *Assessment of karst development potential in the Kabirkuh valley in Ilam province*. Second National Water Crisis Conference (Climate Change, Water, and Environment), Shahrekord. (In Persian with English abstract)